JNC TN8430 2003−009

緩衝材の熱物性測定試験(Ⅲ)

― 面熱源法による緩衝材熱物性の取得 ―

（ 試 験 報 告 ）

２００３年１２月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

〒319-1184　茨城県那珂郡東海村村松４番地４９
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Ⓚ

JNC TN8430 2003-009
2003 年 12 月

緩衝材の熱物性測定試験（III）
－面熱源法による緩衝材熱物性の取得－
（試験報告）

菊池広人**，棚井憲治*

要　旨

従来，熱解析に必要となる緩衝材の比熱については，熱伝導率および熱拡散率の測定を手法の異なる方法や別々の供試体を用いて行い算出してきた。しかしながら，測定手法の違いや同一供試体を用いることができないことによって，供試体作製時の不均一性などがデータのばらつきなどの要因になることも考えられる。

このような観点から，データの品質保証ならびに関係式の標準化を図るために，これら熱特性を同時に測定し，かつ，面による測定のため供試体表面の場を平均的に測定が行える非定常面熱源法測定装置を用いてベントナイト単体試料およびケイ砂混合体試料について熱伝導率及び熱拡散率の測定し，両者の関係から比熱を求めた。

試験の結果，緩衝材の熱伝導率，比熱ともに供試体の含水比によって大きく変化する。また，緩衝材の熱伝導率および比熱について緩衝材材料の含水比の関数として定式化を行った。

*　東海事業所　環境保全・研究開発センター 処分研究部　処分バリア性能研究グループ
**　検査開発株式会社

JNC TN8430 2003-009
December, 2003

Heat physical properties examination of buffer material (III)
(Testing Document)

Hirohito KIKUCHI**and Kenji TANAI*

Abstract

In general, the specific heat of buffer material for the thermal analysis is calculated from the thermal conductivity and the thermal diffusivity measured by using a different measurement technique and different specimen. However, these points have caused wide distribution of data. It is necessary to measure thermal characteristics with various methods at the same time for the quality assurance of data and to standardize the relational equation.

Therefore, the specific heat of bentonite and bentonite/sand mixtures material was calculated by the surface-source method which was able to measure the thermal conductivity and thermal diffusivity at the same time.

Experimental results are as follows ;

・The thermal conductivity and the specific heat of buffer material increase as the water content increase.
・The thermal conductivity and the specific heat of buffer material change as a function of the water content of buffer material.

* Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division,
Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

** Inspection Development Corporation

目　　次

図　目　次

表 目 次

写 真 目 次

1　はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における廃棄体の埋設レイアウトは，ニアフィールドの温度，空洞安定性，人工バリアに必要な寸法，地質環境特性などからくる制限や条件を満たし，合理的な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの組み合せによって設定される。このうち，ニアフィールドの温度については，廃棄体が核種の崩壊により発熱するため，ガラス固化体，緩衝材および周辺岩盤の熱的影響の観点から最大上昇温度が制限される。このため廃棄体埋設レイアウトに関する検討として，処分場周辺の温度を把握するために，廃棄体埋設レイアウト，廃棄体の定置方式，処分深度などの，種々の条件でのニアフィールド熱解析が第２次取りまとめ（サイクル機構，1999）までに実施されている。

従来，熱解析に必要となる緩衝材の比熱については，線熱源法により熱伝導率を，点熱源法により熱拡散率をそれぞれ測定し，これら両者の関係から求めてきた（鈴木・谷口，1999)。しかしながら，これら熱特性の取得（熱伝導率及び熱拡散率の測定）に際しては，測定手法の違いから同一供試体にて測定できないという問題を有しており，供試体作製時の不均一性がデータのばらつきなどの要因になることも考えられる。

本報告においては，上記のような観点から，データの品質保証ならびに関係式の標準化を図るために，これら熱特性を同時に測定し，かつ，面による測定のため供試体表面の場を平均的に測定が行える非定常面熱源法（以下，ホットディスク法熱物性とする）測定装置を用いてベントナイト単体試料およびケイ砂混合体試料について熱伝導率及び熱拡散率の測定を実施し，熱伝導率および比熱の含水比依存性に関する定式化を行ったので報告する。

2　試験方法および性能確認

2.1 測定原理

ホットディスク法熱物性測定装置は，図 2-1 に示すようにセンサーを 2 個の試料で挟み込みセンサーに定電流を流すことによって一定量を発熱させ，センサーの温度上昇から熱物性を求めるものである。センサーは，二重ら旋構造になっており，発熱源であるとともに，温度変化をセンサーの電気抵抗変化として捉えることができる。また，写真 2-1 にホットディスク法熱物性測定装置およびセンサー部を示す。

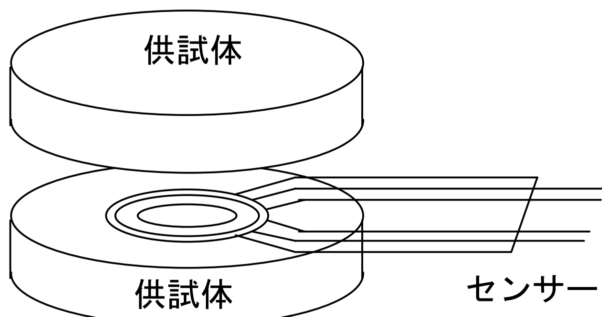


図 2-1　ホットディスク法熱物性測定装置のセットアップ



写真 2-1　ホットディスク法熱物性測定装置およびセンサー部

温度に依存する温度上昇 ΔT_{avg} は次式（1）により与えられる。

$$\Delta T_{avg}(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} r \lambda} D(\tau) \tag{1}$$

ここで，P_o はセンサーに加えられた一定出力（W），r はセンサー半径（m），λ は試料の熱伝導率（W/mK），$D(\tau)$ は次式（2）に示す無次元化された時間の関数である。

$$\tau = \sqrt{\frac{t}{r^2 / \alpha}} \tag{2}$$

ここで，t は，過渡の記録開始から測定される時間（sec），α は供試体の熱拡散率（mm²/s）である。

したがって，熱拡散率 α が正確であるならば，横軸に対して記録された温度を入力すれば，傾きが $P_0 / \pi^{3/2} r\lambda$ の直線が得られる。すなわち，熱拡散率を変化させて直線が得られるように逐次近似を行い，熱伝導率と熱拡散率を同時に決定することになる。このように一度の測定で両物性値を同時に求めることができる。

2.2 ホットディスク法熱物性測定装置の性能確認試験

ステンレス（SUS 304）を用いてホットディスク法熱物性測定装置による性能確認試験を行った。表 2-1 および図 2-2 に性能確認試験より測定した値と文献値（日本機械工学, 1986）を示す。確認試験の結果，これらはほぼ同等の値であった。

表 2-1　性能確認試験結果

試料名	熱伝導率 [W/mK]	熱拡散率 [m²/s]
NO.1	14.23	3.97E-6
NO.2	14.72	4.46E-6
NO.3	14.94	4.12E-6
文献値	16.0	4.07E-6

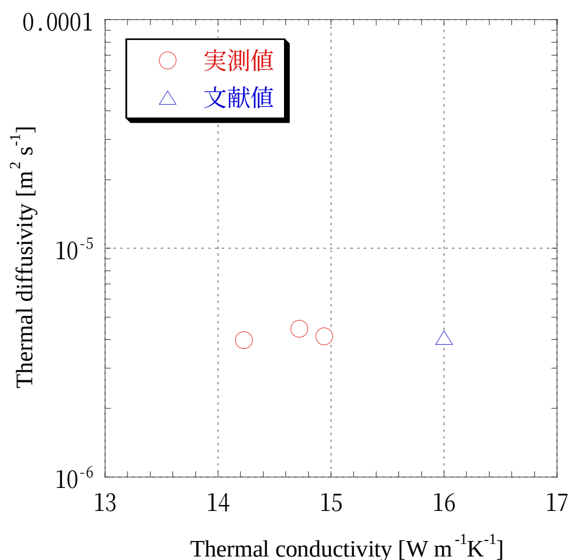


図 2-2　性能確認試験結果

3　試験条件

3.1 試験材料

ベントナイトには，クニゲル V1（クニミネ工業製　山形県月布産　Na 型ベントナイト）を用いた。クニゲル V1 の鉱物組成（伊藤ほか，1993）を表 3-1 に，クニゲル V1 の粒径分布を図 3-1 に示す。なお，クニゲル V1 の粒度は，レーザー回折式粒度分布測定装置（島津製作所製）によって測定したものである。

表 3-1　クニゲル V1 の鉱物組成

鉱物種	定量結果［wt%］	
スメクタイト	46～49	
石英	29～38	（0.5～0.7）
玉髄		（37～38）
斜長石	2.7～5.5	
方解石	2.1～2.6	
苦灰石	2.0～2.8	
方沸石	3.0～3.5	
黄鉄鉱	0.5～0.7	

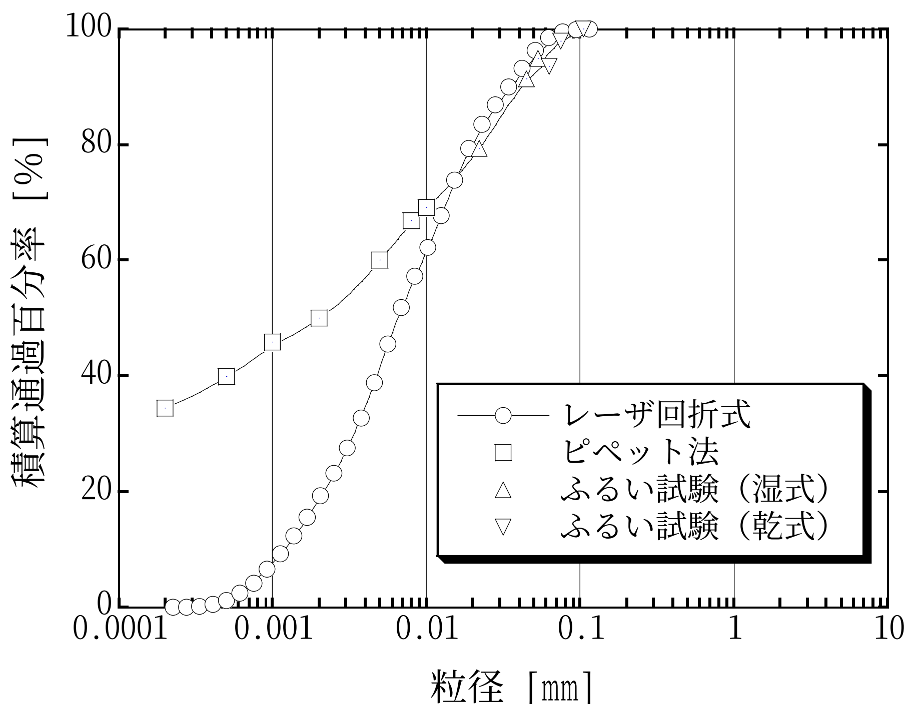


図 3-1　クニゲル V1 粒度分布

また，試験にはベントナイトクニゲル V1 とケイ砂を混合した試料（以下，ケイ砂混合体という）を用いた。使用したケイ砂は，ケイ砂 3 号とケイ砂 5 号を質量比 1：1 で混合したものを用いた。ケイ砂の化学組成（佐藤ほか，1990）を表 3-2 に，粒径加積曲線を図 3-2 に示す。

表 3-2　ケイ砂の化学組成

成分［wt%］	ケイ砂 3 号	ケイ砂5号（パールサンド）
SiO_2	94.6	99.78
Al_2O_3	3.32	0.05
Fe_2O_3	0.13	0.01
TiO_2	-	0.03
MgO	-	<0.01
Na_2O	-	0.01
K_2O	-	0.01
Ig.loss	-	0.12

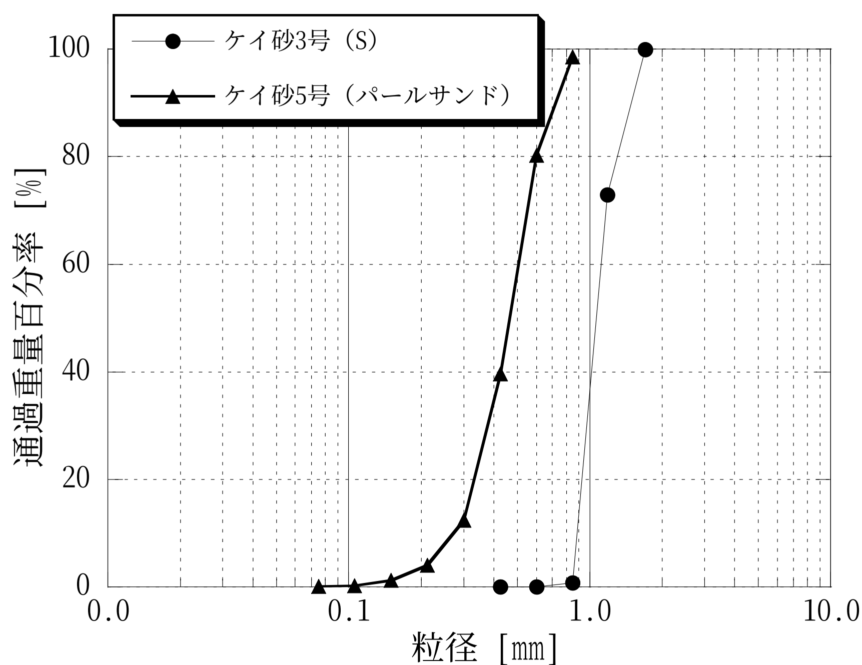


図 3-2　ケイ砂の粒径加積曲線

3.2 試験パラメータ

試験条件を表 3-3 に示す。ベントナイト単体及びケイ砂混合体を対象に，供試体の乾燥密度および含水比をパラメータとして試験を実施した。供試体の含水比は 0%～各乾燥密度における飽和含水比（飽和度 100%）とし，測定を行った。

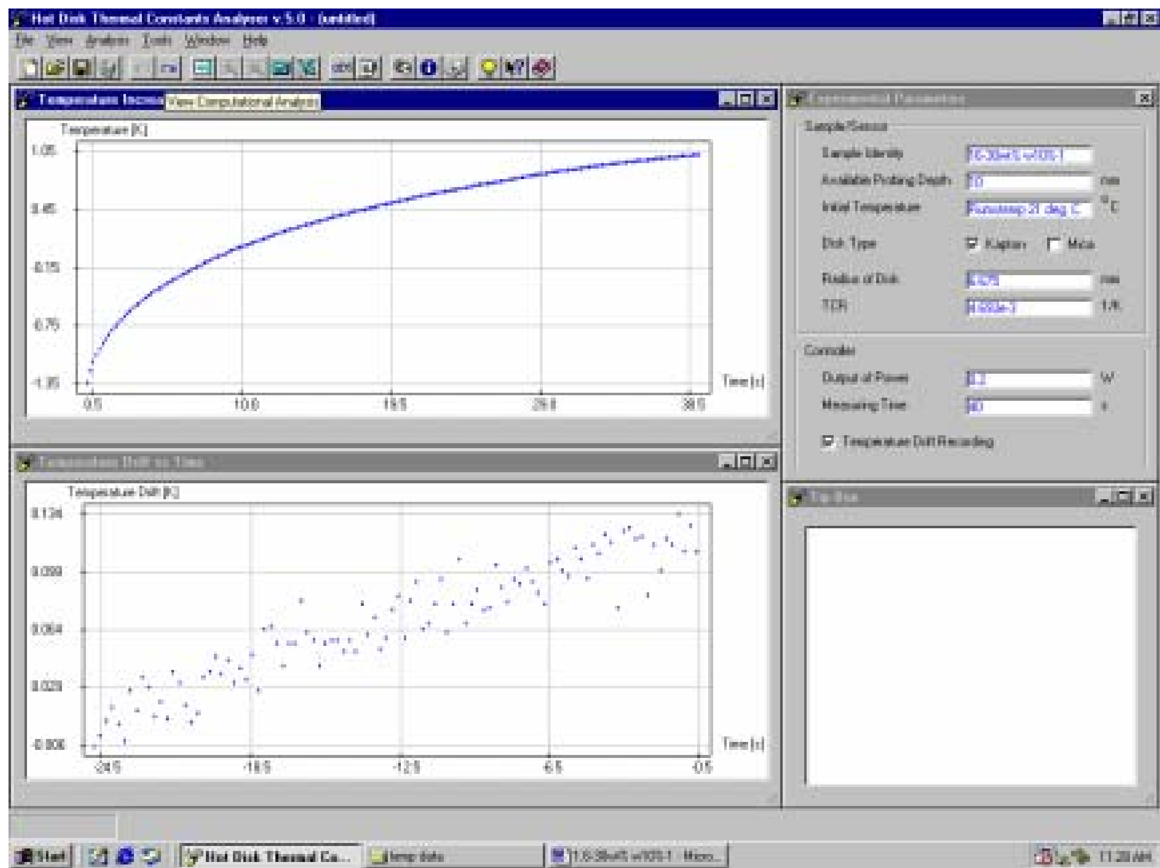
表 3-3　熱物性試験条件

	ベントナイト単体	ケイ砂混合体
試　料	ベントナイト（クニゲル V1）	
乾燥密度[Mg/m³]	1.2、1.4、1.6、1.8	1.4、1.6、1.8
ケイ砂混合率[%]	0	30
飽和度[%]	0～100	
供試体寸法[mm]	φ50×h10	
装置発熱量[W]	0.1～0.4	0.2～0.4
測定時間[sec]	80～160	40～80
雰囲気温度[℃]	室温（約 20℃）	
測定回数[回]	3	

4　熱物性測定結果

4.1 面熱源法による測定結果

ホットディスク法熱物性測定装置(TPA-501)の測定ウインドウを乾燥密度 1.6[Mg/m³]，ケイ砂混合率 30[wt%]，含水比 10[%]のデータを一例として図 4-1 に示す。図 4-1 の上の図は，温度上昇カーブである。本装置では測定時間中に 200 個所の測定点での抵抗値上昇温度を記録する。２番目の図は，測定を開始する前の温度ドリフトである。測定が良好な条件で行われたか否かの判断を行うとともに，測定を開始する前の温度ドリフトから予想される測定中の温度ドリフトを補正計算し，熱特性を同定することができる。３番目の図は，温度の偏差を表すものであり，センサーの絶縁層あるいは，供試体境界面の影響の有無を判断するものであり，場合により 200 点の温度設定点から削除することになる。最後の図は，無次元化された特性時間と温度の関係であり，（1）～（2）式に示すように，特性時間を変化させ温度が直線になるように調整を行い熱伝導率，熱拡散率を求めるものである。



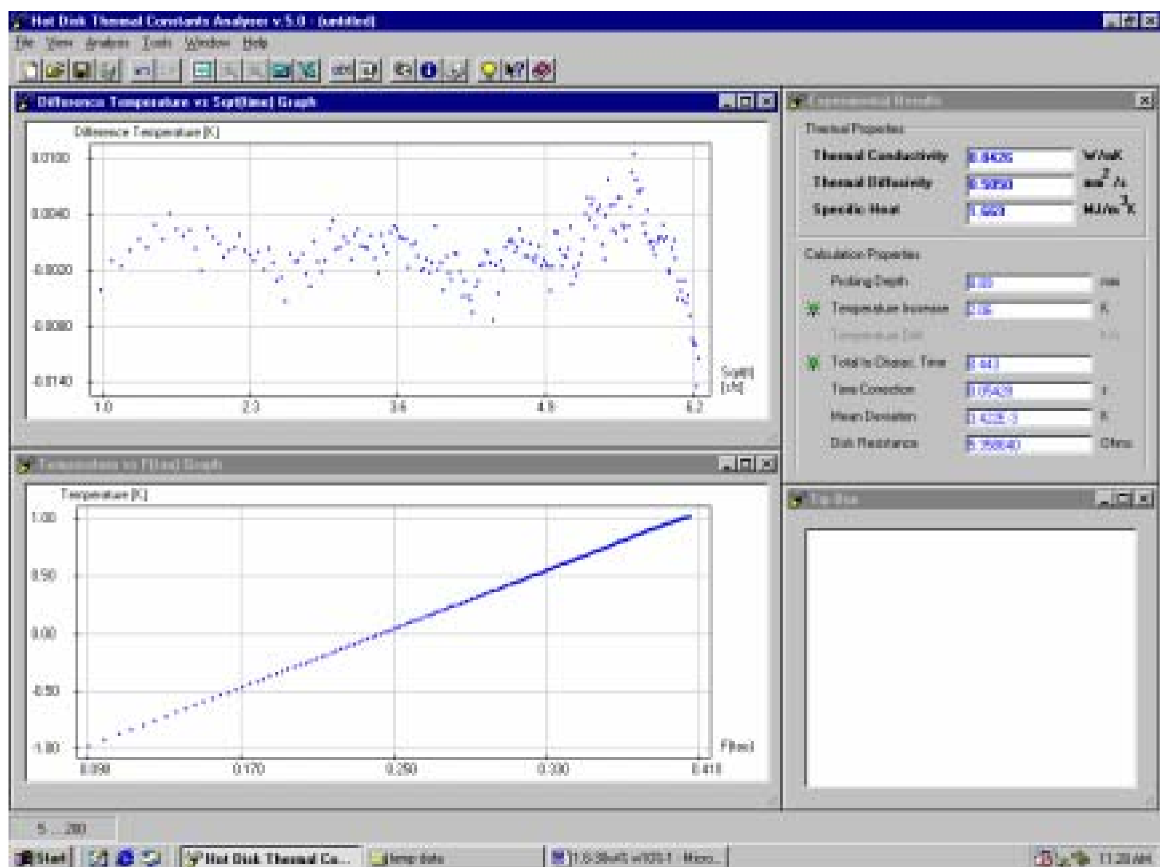


図 4-1　ホットディスク法熱物性測定装置(TPA-501)の測定ウインドウ

4.2 熱伝導率の測定結果

ベントナイト単体およびケイ砂混合体に関する熱伝導率の測定結果を図 4-2, 図 4-3 にそれぞれ示す。図 4-2 には，本測定方法とは異なるヒートプローブ法（藤田ほか，1992）および線熱源法（鈴木ほか,1999；谷口ほか，1999）によってそれぞれ測定された値と合わせて示す。また，図 4-3 には，線熱源法（鈴木ほか,1999；谷口ほか，1999）によって測定された値とともに示す。図から各乾燥密度とも含水比の増加とともに熱伝導率が大きくなる結果となった。また，異なる測定方法でも熱伝導率はよく一致しており，これはホットディスク法熱物性測定装置によって測定された緩衝材材料の熱伝導率が妥当であることを示すものである。

一般に，土の熱伝導率は，固相率・含水率・石英含有量・有機物含有量に依存して変化すると言われている（Gaylon S Campbell 著，中野政詩，東山勇訳，1987)。ベントナイト単体の供試体は，ケイ砂混合の供試体よりも固相率が大きいが，ケイ砂の主成分である石英が多く含まれるため，これらの影響により両者の熱伝導率に大きな差異はない結果となった。

また，土の熱伝導率は低水分領域では空気間隙が，高水分領域では固相の効果が大きくなり，熱伝導率が低い値から高い値へと移る水分域が存在すると言われている（Gaylon S Campbell 著，中野政詩，東山勇訳，1987)。これは，図 4-3 に示すケイ砂混合体の測定結果に顕著に見られる。このような現象を再現するため近似曲線として，各測定手法から測定された熱伝導率 λ [W/(mK)]と含水比 w [%]の関係を定式化すれば，供試体の含水比が 0%から各乾燥密度における飽和含水比の間で，（3）～（9）式となる。

ベントナイト単体の場合

乾燥密度 1.2[Mg/m³]　$\lambda = 0.1380 + 00296w + 0.00005w^2$　$R^2 = 0.9943$（3）

乾燥密度 1.4[Mg/m³]　$\lambda = 0.2677 + 0.0333w + 0.0001w^2$　$R^2 = 0.9918$（4）

乾燥密度 1.6[Mg/m³]　$\lambda = 0.3885 + 0.0479w - 0.0002w^2$　$R^2 = 0.9893$（5）

乾燥密度 1.8[Mg/m³]　$\lambda = 0.5470 + 0.0647w - 0.0007w^2$　$R^2 = 0.9695$（6）

ケイ砂混合体の場合

乾燥密度 1.4[Mg/m³]　$\lambda = 0.364 + 0.0178w + 0.003w^2 - 6.4\times10^{-5}w^3$　$R^2 = 0.9753$（7）

乾燥密度 1.6[Mg/m³]　$\lambda = 0.481 + 0.0101w + 0.0064w^2 - 17.7\times10^{-5}w^2$　$R^2 = 0.9875$（8）

乾燥密度 1.8[Mg/m³]　$\lambda = 0.728 + 0.008w + 0.0115w^2 - 0.00045w^3$　$R^2 = 0.9905$（9）

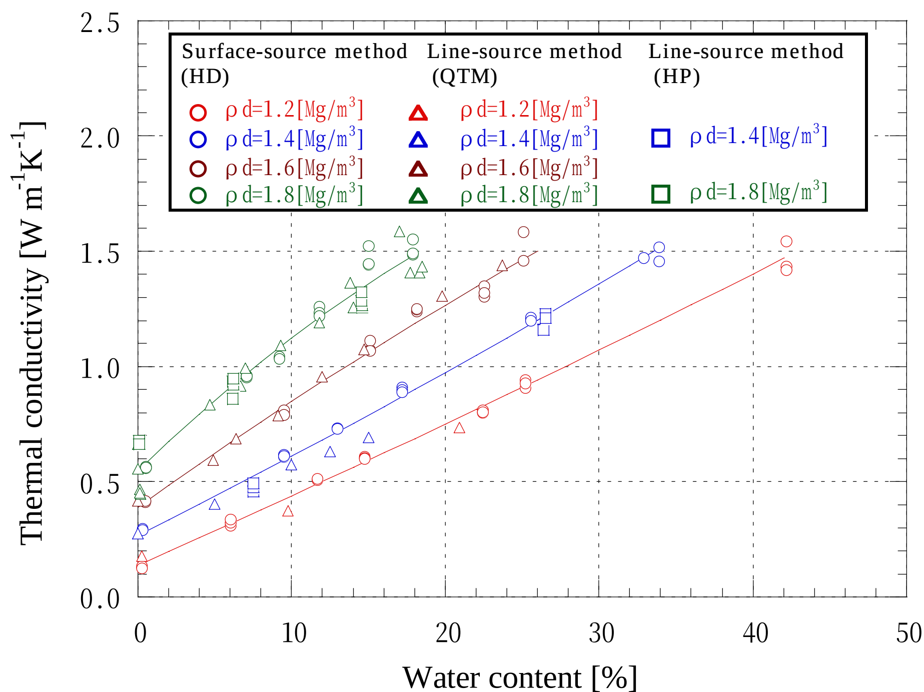


図 4-2　熱伝導率の測定結果（ベントナイト単体）

HD：ホットディスク法，QTM：線熱源法，HP：ヒートプローブ法

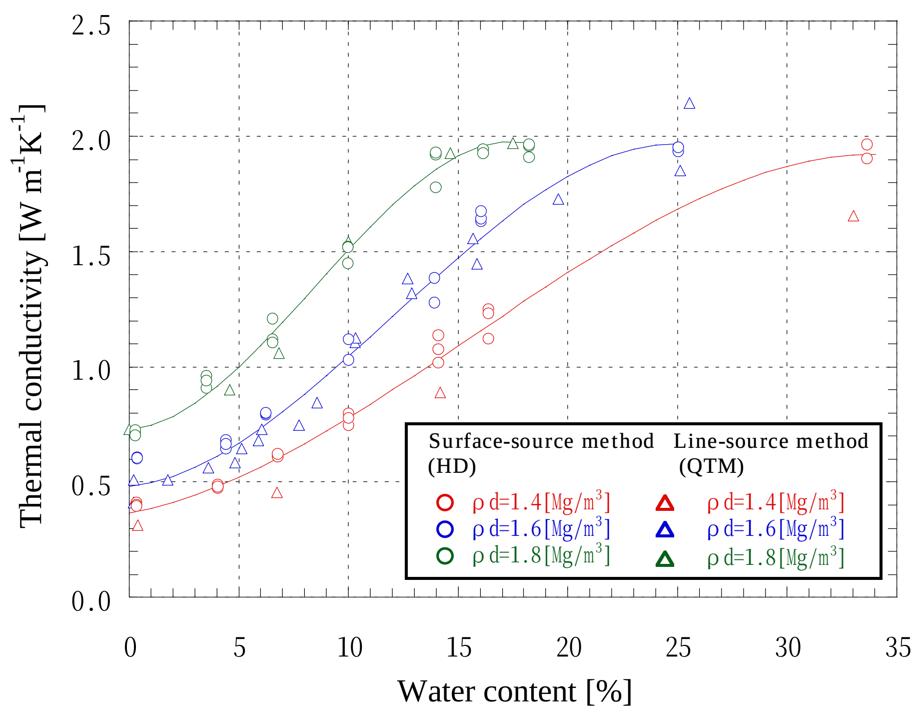


図 4-3　熱伝導率の測定結果（ケイ砂混合体）

HD：ホットディスク法，QTM：線熱源法

4.3 熱拡散率の測定結果

ベントナイト単体およびケイ砂混合体に関する熱拡散率の測定結果を図 4-4, 図 4-5 にそれぞれ示す。熱伝導率同様，図 4-4，図 4-5 には，本測定方法とは異なるヒートプローブ法（藤田ほか，1992）によって取得された値および球状プローブ法（鈴木ほか,1999）によって測定された値とともに示す。また，図 4-4 には，球状プローブ法（鈴木ほか,1999）によって取得された値とともに示す。図から熱拡散率においては，供試体の含水比に関わらずほぼ一定の値を示す結果となった。また，異なる測定方法の比較においては，面熱源法で測定した場合、線熱源法および点熱源法に比べ，熱拡散率は多少低い値を示すことが分かった。このデータの違いにおいては，本来，測定全体の熱拡散率を測定しなくてはならないのに対して，線熱源法および点熱源法ともに測定点周辺の温度変化のみを測定してしまったため面熱源法に比べ，熱拡散率が高くなったものと考えられる。

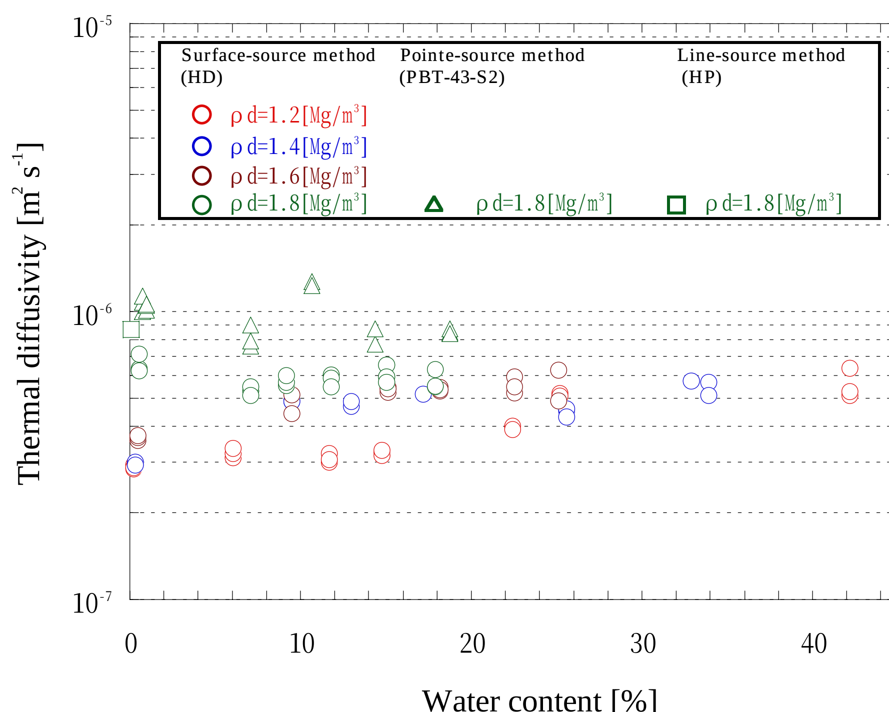


図 4-4　熱拡散率の測定結果（ベントナイト単体）

HD：ホットディスク法，PBT-43-S2：球状プローブ法，HP：ヒートプローブ法

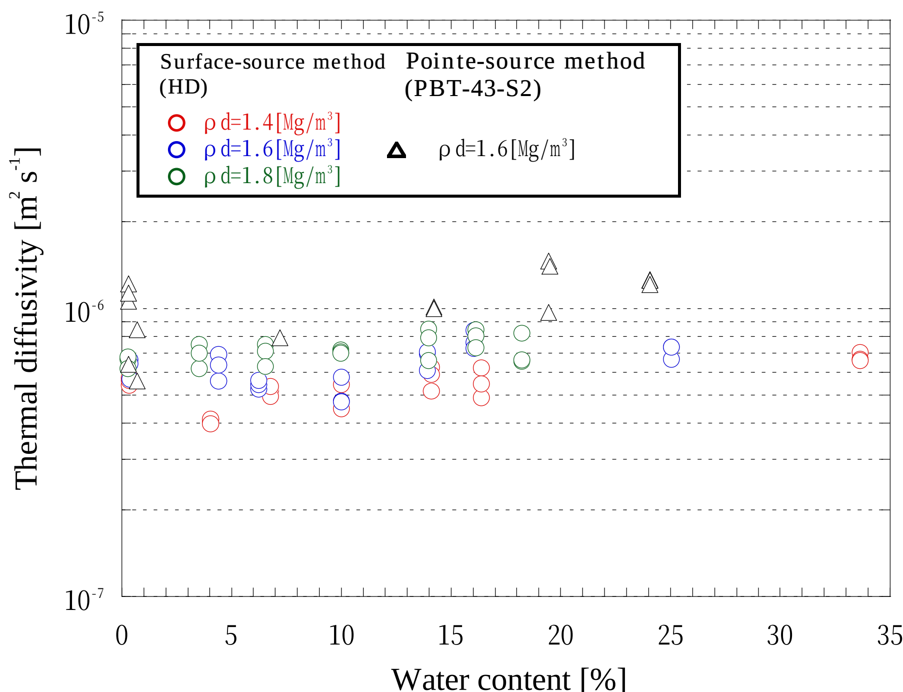


図 4-5　熱拡散率の測定結果（ケイ砂混合体）
HD：ホットディスク法，PBT-43-S2：球状プローブ法，HP：ヒートプローブ法

4.4 比熱

比熱と熱拡散率および熱伝導率の間には次式（10）の関係がある。

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} \qquad (10)$$

ここで，熱拡散率 α [m²/s]は，熱伝導率 λ [W/mK]を比熱 c [kJ/kgK]および単位体積重量 ρ [kg/m³]で除したものであり，物質内の温度が非定常状態分布となる場合の熱拡散性の程度を示す係数である。

従って，熱伝導率と熱拡散率から緩衝材材料の比熱を求めることができる。表 4-1（1）～（4）に熱伝導率，熱拡散率および比熱をあわせて示す。また，比熱と供試体の含水比との関係を第 2 次取りまとめまでに取得されたデータとともに図 4-6，図 4-7 に示す。図から比熱においては，第 2 次取りまとめまでに取得された計算に比べ，4.3 に記載したように，熱拡散率の影響により多少高い値が算出されたものと考えられる。

表 4-1（1）　熱物性値測定結果（ベントナイト単体）

NO.	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m³]	湿潤密度 [Mg/m³]	熱伝導率λ [W/mk]	熱拡散率α [mm²/s]	比熱C [KJ/kgK]
1	0.25	1.20	1.203	0.129	0.2942	0.364
	0.25	1.20	1.203	0.135	0.2841	0.395
	0.25	1.20	1.203	0.124	0.2874	0.359
2	6.05	1.20	1.272	0.3115	0.3115	0.786
	6.05	1.20	1.272	0.321	0.321	0.786
	6.05	1.20	1.272	0.3362	0.3362	0.786
3	11.68	1.20	1.340	0.508	0.3012	1.258
	11.68	1.20	1.340	0.5138	0.322	1.191
	11.68	1.20	1.340	0.5135	0.3057	1.253
4	14.76	1.21	1.389	0.6081	0.3252	1.347
	14.76	1.21	1.389	0.6037	0.3173	1.370
	14.76	1.21	1.389	0.5984	0.3295	1.308
5	22.43	1.21	1.481	0.7988	0.3993	1.350
	22.43	1.21	1.481	0.8121	0.4012	1.366
	22.43	1.21	1.481	0.8011	0.3893	1.389
6	25.21	1.21	1.515	0.9063	0.5114	1.170
	25.21	1.21	1.515	0.9421	0.5204	1.195
	25.21	1.21	1.515	0.9274	0.5094	1.202
7	44.9	1.22	1.768	1.542	0.6351	1.373
	44.9	1.22	1.768	1.433	0.5107	1.587
	44.9	1.22	1.768	1.418	0.5265	1.524
8	0.294	1.39	1.394	0.2945	0.2948	0.717
	0.294	1.39	1.394	0.2889	0.3011	0.688
	0.294	1.39	1.394	0.2911	0.2938	0.711
9	9.51	1.42	1.555	0.6179	0.4868	0.816
	9.51	1.41	1.544	0.6098	0.4902	0.806
	9.51	1.41	1.544	0.6127	0.4868	0.815
10	12.98	1.41	1.593	0.7339	0.47	0.980
	12.98	1.41	1.593	0.7312	0.4689	0.979
	12.98	1.41	1.593	0.7299	0.487	0.941
11	17.19	1.41	1.652	0.9092	0.5174	1.063
	17.19	1.40	1.641	0.8989	0.518	1.058
	17.19	1.40	1.641	0.8899	0.5168	1.050
12	25.57	1.41	1.771	1.201	0.4528	1.498
	25.57	1.41	1.771	1.213	0.4612	1.485
	25.57	1.41	1.771	1.198	0.4321	1.566
13	32.9	1.43	1.900	1.471	0.5744	1.348
	33.9	1.41	1.888	1.516	0.5692	1.411
	33.9	1.41	1.888	1.457	0.5119	1.508

表 4-1（2）　熱物性値測定結果（ベントナイト単体）

NO.	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m³]	湿潤密度 [Mg/m³]	熱伝導率λ [W/mk]	熱拡散率α [mm²/s]	比熱C [KJ/kgK]
14	0.47	1.59	1.597	0.4159	0.3567	0.730
	0.47	1.59	1.597	0.4102	0.3648	0.704
	0.47	1.59	1.597	0.4174	0.371	0.704
15	9.51	1.61	1.763	0.8024	0.5129	0.887
	9.51	1.61	1.763	0.8097	0.4429	1.037
	9.51	1.61	1.763	0.7897	0.4429	1.011
16	15.11	1.61	1.853	1.071	0.5239	1.103
	15.11	1.61	1.853	1.111	0.5449	1.100
	15.11	1.61	1.853	1.067	0.539	1.068
17	18.16	1.60	1.891	1.239	0.5311	1.234
	18.16	1.60	1.891	1.247	0.5456	1.209
	18.16	1.60	1.891	1.251	0.536	1.235
18	22.53	1.61	1.973	1.349	0.5229	1.308
	22.53	1.61	1.973	1.302	0.595	1.109
	22.53	1.61	1.973	1.321	0.547	1.224
19	25.1	1.61	2.014	1.584	0.6248	1.259
	25.1	1.61	2.014	1.459	0.4911	1.475
	25.1	1.61	2.014	1.459	0.4911	1.475
20	0.54	1.80	1.810	0.5663	0.6342	0.493
	0.54	1.80	1.810	0.5586	0.7112	0.434
	0.54	1.80	1.810	0.5613	0.623	0.498
21	7.07	1.80	1.927	0.96	0.53	0.940
	7.07	1.80	1.927	0.954	0.548	0.903
	7.07	1.80	1.927	0.959	0.511	0.974
22	9.19	1.80	1.965	1.036	0.5549	0.950
	9.19	1.80	1.965	1.042	0.569	0.932
	9.19	1.80	1.965	1.033	0.599	0.877
23	11.81	1.79	2.001	1.259	0.6017	1.045
	11.81	1.79	2.001	1.233	0.5867	1.050
	11.81	1.79	2.001	1.219	0.548	1.111
24	15.03	1.79	2.059	1.524	0.6531	1.133
	15.03	1.79	2.059	1.442	0.5944	1.178
	15.03	1.79	2.059	1.446	0.5704	1.231
25	17.9	1.82	2.146	1.553	0.6292	1.150
	17.9	1.82	2.146	1.485	0.547	1.265
	17.9	1.82	2.146	1.491	0.5521	1.259

表 4-1（3） 熱物性値測定結果（ケイ砂混合体）

NO.	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m³]	湿潤密度 [Mg/m³]	熱伝導率 λ [W/mk]	熱拡散率 α [mm²/s]	比熱 C [KJ/kgK]
26	0.33	1.40	1.400	0.411	0.5422	0.542
	0.33	1.40	1.400	0.402	0.5624	0.511
	0.33	1.40	1.400	0.397	0.5744	0.494
27	4.05	1.39	1.451	0.4885	0.4016	0.838
	4.05	1.39	1.451	0.4759	0.4132	0.794
	4.05	1.39	1.451	0.4797	0.399	0.829
28	6.76	1.39	1.489	0.6143	0.5168	0.798
	6.76	1.39	1.489	0.6121	0.4963	0.828
	6.76	1.39	1.489	0.6215	0.5381	0.776
29	9.99	1.40	1.542	0.746	0.4771	1.014
	9.99	1.40	1.542	0.7988	0.5447	0.951
	9.99	1.40	1.542	0.7797	0.4513	1.120
30	14.09	1.40	1.593	1.018	0.5182	1.233
	14.09	1.40	1.593	1.139	0.6253	1.143
	14.09	1.40	1.593	1.076	0.5895	1.146
31	16.38	1.41	1.647	1.124	0.4901	1.394
	16.38	1.41	1.647	1.251	0.6224	1.220
	16.38	1.41	1.647	1.232	0.549	1.363
32	33.64	1.41	1.880	1.905	0.7058	1.432
	33.64	1.41	1.880	1.966	0.6671	1.564
	33.64	1.41	1.880	1.965	0.6602	1.580
33	0.37	1.60	1.602	0.602	0.6644	0.566
	0.37	1.60	1.602	0.607	0.5694	0.666
	0.37	1.60	1.602	0.607	0.6449	0.587
34	4.41	1.58	1.651	0.646	0.5597	0.699
	4.41	1.58	1.651	0.6835	0.6952	0.596
	4.41	1.58	1.651	0.667	0.6359	0.635
35	6.24	1.59	1.694	0.7923	0.5252	0.890
	6.24	1.59	1.694	0.7997	0.5465	0.864
	6.24	1.59	1.694	0.803	0.5625	0.842
36	10.01	1.60	1.763	1.031	0.4778	1.224
	10.01	1.60	1.763	1.031	0.4748	1.232
	10.01	1.60	1.763	1.12	0.5776	1.103
37	13.90	1.60	1.819	1.28	0.6109	1.152
	13.90	1.60	1.819	1.387	0.6963	1.095
	13.90	1.60	1.819	1.388	0.7102	1.074
38	16.04	1.61	1.867	1.634	0.8399	1.042
	16.04	1.61	1.867	1.644	0.7627	1.155
	16.04	1.61	1.867	1.675	0.7269	1.234
39	25.04	1.60	2.006	1.953	0.7341	1.326
	25.04	1.60	2.006	1.936	0.6674	1.446
	25.04	1.60	2.006	1.953	0.7340	1.326

表 4-1（4）　熱物性値測定結果（ケイ砂混合体）

NO.	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m³]	湿潤密度 [Mg/m³]	熱伝導率λ [W/mk]	熱拡散率α [mm²/s]	比熱 C [KJ/kgK]
40	0.28	1.79	1.794	0.714	0.6674	0.597
	0.28	1.79	1.794	0.727	0.6783	0.597
	0.28	1.79	1.794	0.704	0.6208	0.632
41	3.51	1.80	1.864	0.9091	0.6197	0.787
	3.51	1.80	1.864	0.9621	0.7521	0.686
	3.51	1.80	1.864	0.9411	0.7005	0.721
42	6.54	1.80	1.917	1.211	0.7501	0.842
	6.54	1.80	1.917	1.12	0.7134	0.819
	6.54	1.80	1.917	1.107	0.6303	0.916
43	9.98	1.79	1.973	1.45	0.7197	1.021
	9.98	1.79	1.973	1.523	0.7088	1.089
	9.98	1.79	1.973	1.519	0.6997	1.100
44	13.98	1.80	2.036	1.781	0.6604	1.324
	13.98	1.80	2.036	1.923	0.848	1.114
	13.98	1.80	2.036	1.932	0.7937	1.195
45	1.613	1.78	2.072	1.944	0.8436	1.112
	1.613	1.78	2.072	1.945	0.8027	1.169
	1.613	1.78	2.072	1.929	0.7327	1.271
46	18.22	1.80	2.130	1.961	0.820	1.123
	18.22	1.80	2.130	1.911	0.656	1.369
	18.22	1.80	2.130	1.965	0.666	1.386

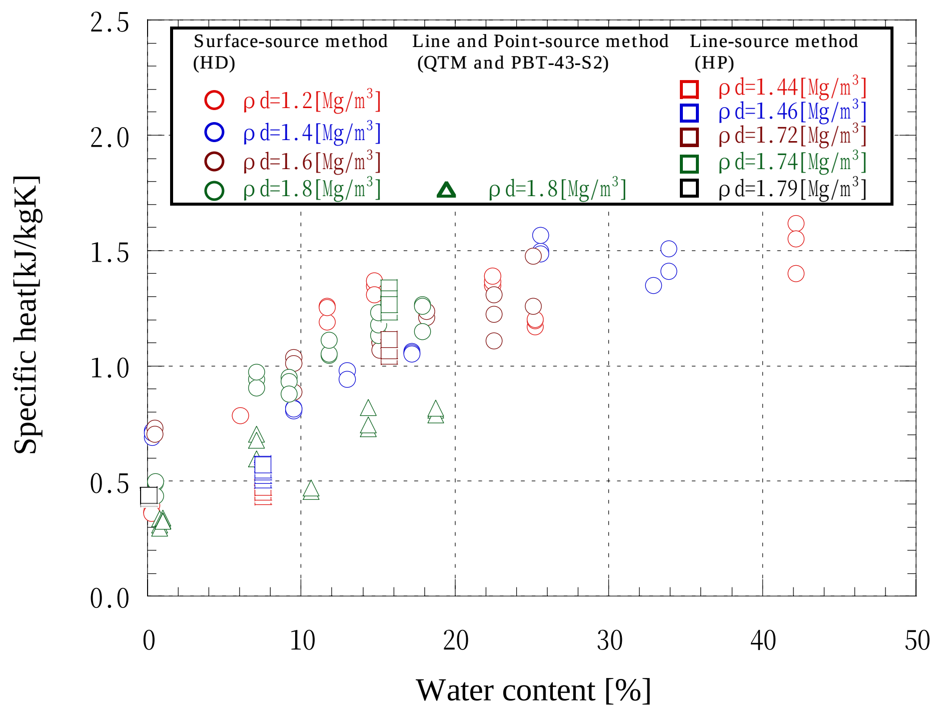


図 4-6　含水比と比熱の関係（ベントナイト単体）
HD:ホットディスク法，QTM:線熱源法，PBT-43-S2:球状プローブ法，HD:ヒートプローブ法

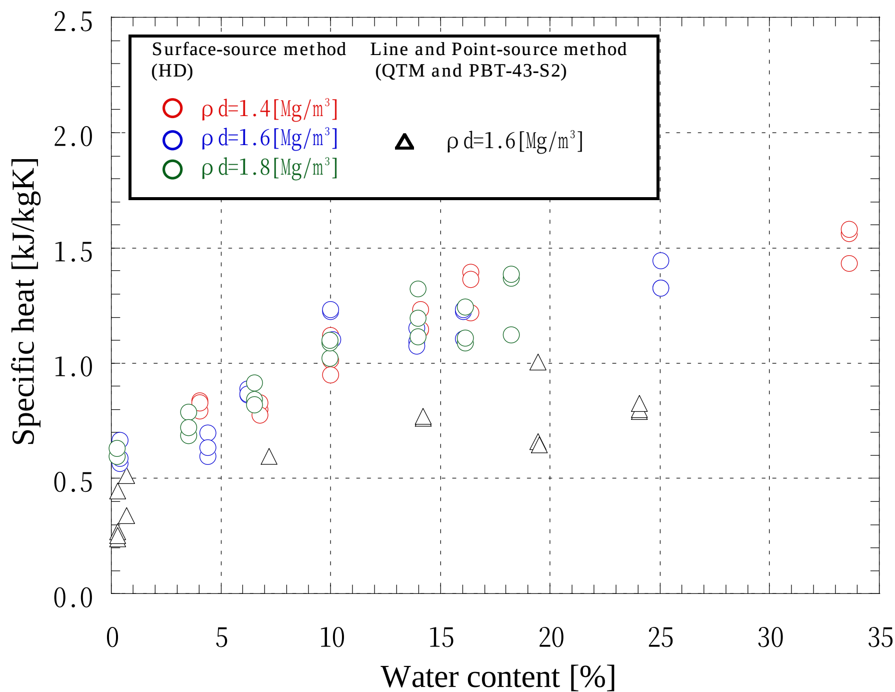


図 4-7　含水比と比熱の関係（ケイ砂混合体）
HD:ホットディスク法，QTM:線熱源法，PBT-43-S2:球状プローブ法

また，比熱は前記したように実験的に求めることができるが，土の物理特性から予測した方が簡便であり，熱伝導解析の際のモデル化に用いられている方法がある。

土の比熱は，土を構成する固相・液相・気相の単位体積当たりの重量比と各々の比熱の積の総和で表わせることが知られており（例えば，Gaylon S Campbell 著，中野政詩，東山勇訳，1987），

$$c = c_s\rho_s + c_w\rho_w + c_a\rho_a \tag{11}$$

である。ここで添字 s , w , a は各相を表す。このうち，気相の項は他に比べて十分小さいので無視することができる。

すなわち，

$$c = c_s\frac{m_s}{m_s+m_w} + c_w\frac{m_w}{m_s+m_w} = c_s\frac{1}{1+\frac{m_w}{m_s}} + c_w\frac{1}{1+\frac{m_s}{m_w}} = c_s\frac{1}{1+w} + c_w\frac{1}{1+\frac{1}{w}} \tag{12}$$

$$= \frac{c_s + c_w w}{1+w} \tag{13}$$

である。ここで， m は質量， w は含水比[-]を表す。

従って，固相の比熱を求めれば，緩衝材材料中の水分の増加に伴う比熱の変化を予想することができる。

固相の比熱は，水分を含まない供試体で測定した熱伝導率および熱拡散率より求めることができ，緩衝材の固相の比熱は，各乾燥密度から得られた値の平均値を用いて，ベントナイト単体の場合，0.576[kJ/kgK]，ケイ砂混合体の場合，0.577[kJ/kgK]となる。

また，測定値において多少バラツキがある為，全測定値を用いて緩衝材の固相の比熱を最小二乗法により求めた場合，ベントナイト単体の場合，0.631[kJ/kgK]，ケイ砂混合体の場合，0.6732[kJ/kgK]となる。これらのことからそれぞれの値に差異はないため，理論式における固相の比熱においては，最小二乗法によって得られた値を用いることとした。

さらに，(13）式に基づき，比熱と含水比の関係を実測値と予測値とともに表せば図 4-8，図 4-9 のようになる。なお，水の比熱は文献値より 4.18 kJ/kgK（20℃）とした（日本機械学会，1986）。

面熱源法による各材料の構成要素より予測される比熱 c [kJ/kgK]と含水比 w [%]の関係は以下のようになる。

ベントナイト単体の場合，

$$c = \frac{63.10 + 4.18w}{100 + w} \tag{14}$$

ケイ砂混合体の場合，

$$c = \frac{67.32 + 4.18w}{100 + w} \tag{15}$$

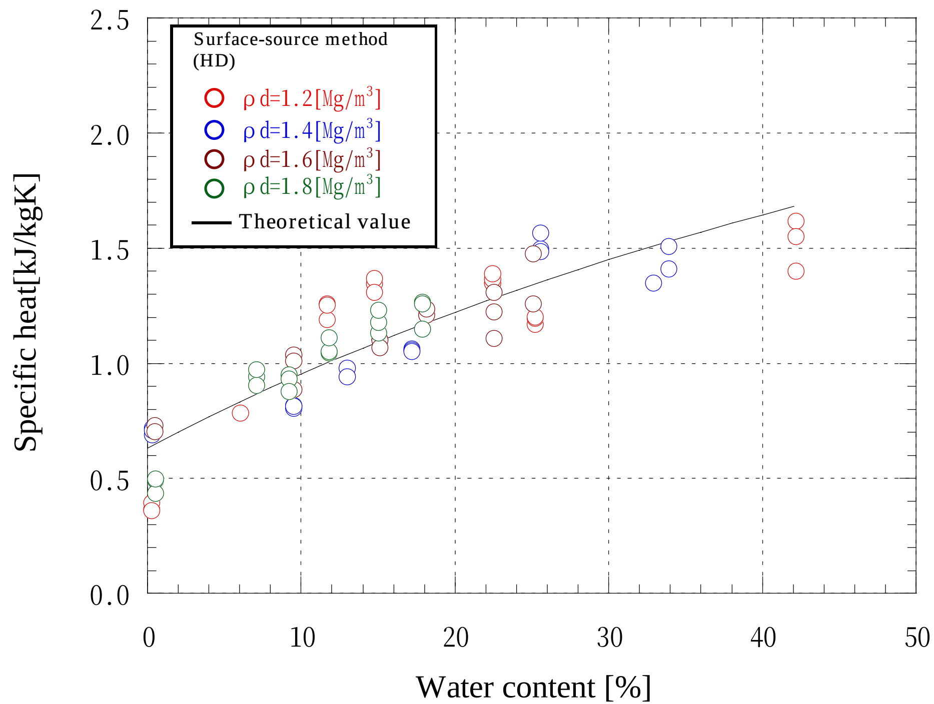


図 4-8　比熱の実測値と予測値の比較（ベントナイト単体）

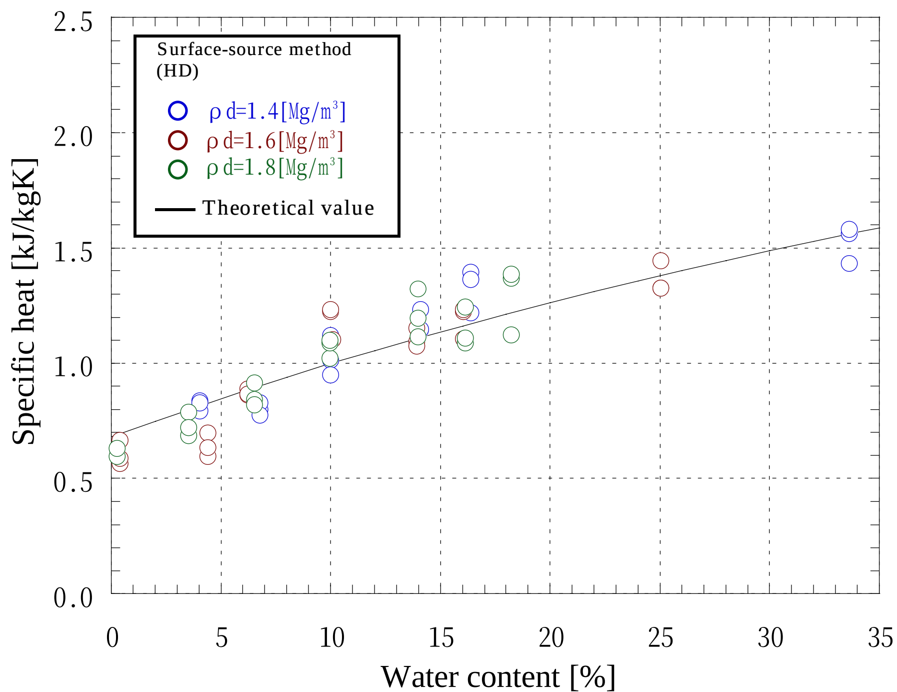


図 4-9　比熱の実測値と予測値の比較（ケイ砂混合体）

5 まとめ

本研究では，熱解析に必要となる緩衝材の熱物性について，データの品質保証ならびに関係式の定型化を図るため，熱伝導率および熱拡散率を同一供試体から同時に測定できる面熱源法（ホットディスク法）を用いて圧縮ベントナイトの熱物性を測定し，熱伝導率および熱拡散率の関係から比熱を求めた。その結果，以下の知見が得られた。

(1) 緩衝材の熱伝導率に関しては，含水比の増加とともに熱伝導率も増加し，第 2 次取りまとめまでに取得された本測定方法とは異なる測定手法の値と比較しても，同等の値が得られた。また，本測定結果および第 2 次取りまとめまでに蓄積された値を合わせ，ニアフィールド熱解析のためのデータとして，緩衝材材料の熱伝導率と含水比の関数として定式化を行った。

(2) 緩衝材の熱拡散率に関しては，含水比の増加に係らずほぼ一定に値が得られた。また，第 2 次取りまとめまでに取得された線熱源法および点熱源法による測定結果と比較した場合，面熱源法の測定結果の方が，多少低い値が得られた。これは，測定手法の違いにおいて，面熱源法で測定した場合，面による測定のため供試体表面の場を平均的に測定が行えたのに対して，線熱源法および点熱源法ともに測定点周辺の温度変化のみを測定してしまったためと考えられる。

(3) 熱伝導率と熱拡散率の関係から求めた比熱に関しては，基質部の比熱に比べて液相の比熱が大きいため，供試体の含水比に大きく依存することが分かった。

(4) これまでに比熱の温度依存性に関しては，供試体中に含有する水の比熱が支配的であり，20～90℃の範囲で水の比熱に温度による変化はほとんどないことが知られていることから，前述した面熱源法による緩衝材材料の比熱を含水比の関数として定式化を行った。

6 おわりに

本研究では，緩衝材の熱解析に必要となる熱物性において，面熱源法を用いたデータの拡充および関係式の定型化を行った。

今後，埋め戻し材料を含めたニアフィールドの熱解析を行ううえで，解析上必要となる埋め戻し材料のデータの拡充を行う予定である。

7　参考文献

核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発 2次取りまとめ-”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-020～024（1999）

核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発　-平成13年度報告-”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2002-003（2002）

核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発　-平成14年度報告-”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2003-004（2003）

日本機会学会：伝熱工学資料　改訂版4版，社団法人日本機械学会（1986）

T.Log，S.E.Guatafsson：“Transient Plane Source(TPS) Technique for Measuring Thermal Transport Properties of Building Materials”, Fire and Materials, vol 19, 43-49（1995）

京都電子株式会社：TPA-501形 ホットディスク法熱物性試験装置 取扱説明書

Gaylon S Campbell 著，中野政詩，東山勇訳：パソコンで学ぶ土の物理学，鹿島出版会（1987）

藤田朝雄, 杉田裕, 納多勝, 幾世橋広:“緩衝材の熱物性試験”, 動燃技術資料, PNC TN1410 92-052（1992）

鈴木英明，谷口航：“緩衝材の熱物性試験(II)”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 99-006（1999）

谷口航，鈴木英明，杉野弘幸，松本一浩，千々松正和，柴田雅博：“熱的特性の緩衝材仕様に対する影響”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-052（1999）